

利用极浅型潜流人工湿地修复沙漠化土地的可行性研究

曹亚锋^{1,2}, 任勇翔¹, 王新伟¹, 陈灿灿¹, 肖海南¹, 刘龙龙¹, 肖松丽¹

(1. 陕西省环境工程重点实验室 西北水资源与环境生态教育部重点实验室

西安建筑科技大学, 陕西 西安 710055; 2. 陕西省建筑设计研究院有限责任公司, 陕西 西安 710018)

摘要: [目的] 探讨以城市污水作为植物生长的水源和肥源, 以期同步实现沙漠化土地的快速修复和污水净化的可行性。[方法] 利用极浅型潜流人工湿地, 湿地填料为细沙, 栽培植物为高羊茅、黑麦草、狗牙根、芦苇和香蒲进行试验设置。[结果] 试验仅 4 个月, 细沙容重减小了 20%~23%, 有机质至少增加了 3.9 倍, 有效磷、pH 值、电导率和孔隙率分别增加了 16%~103%, 3%~5%, 1.7~2.6 倍和 16%~25%, 与原细沙差异性显著 ($p < 0.05$), 而碱解氮、全磷和各湿地细沙理化性质无显著性差异 ($p > 0.05$)。[结论] 极浅型潜流人工湿地能够迅速增加细沙养分含量, 改善细沙理化性质, 以极浅型潜流人工湿地修复沙漠化土地可行。高羊茅和黑麦草可作为修复沙漠化土地的优选植物。

关键词: 沙漠化土地; 人工湿地; 细沙; 理化性质

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2015)04-0136-05

中图分类号: S156.5

DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2015.04.027

Feasibility of Combating Desertification Using Extremely Shallow Subsurface Flow Constructed Wetland

CAO Yafeng^{1,2}, REN Yongxiang¹, WANG Xinwei¹,

CHEN Cancan¹, XIAO Hainan¹, LIU Longlong¹, XIAO Songli¹

(1. Shaanxi Key Laboratory of Environmental Engineering, Key Laboratory of Northwestern Water Resource and Environment Ecology, Ministry of Education, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an, Shaanxi 710055, China; 2. Shaanxi Architectural Design & Research Institute Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710018, China)

Abstract: [Objective] This paper aimed to elucidate the feasibility of using municipal wastewater as the sources of water and fertilizer for the growth of cultivated plant, in order to combating desertification and purifying the pollutants in the taste water. [Methods] Extremely shallow subsurface flow constructed wetlands (SSFCWs) were used to cultivate plants. In the wetlands, fine sand was selected as the substrate. Plants had *Festuca arundinacea*, *Lolium perenne*, *Cynodon dactylon*, *Phragmites australis* and *Typha orientalis*. [Results] After four months' cultivation using waste water in the wetlands, some indices differed significantly with that of original sand ($p < 0.05$). For example, fine sand bulk density reduced by 20%~23%; organic matter increased over 3.9 times; available P, pH value, electrical conductivity and porosity increased by 16%~103%, 3%~5%, 1.7~2.6 times and 16%~25%, respectively. No significant differences of available N, total phosphorus among the original fine sand and substrates of different SSFCWs ($p > 0.05$). [Conclusion] As significant improvements in nutrient contents and physi-chemical characteristics of fine sand were observed, the result demonstrated that it is feasible to restore desertification land using the extremely SSFCWs. It indicated that *F. arundinacea* and *L. perenne* could be used as the preferential plants for combating desertification.

Keywords: desertification land; constructed wetland; fine sand; physi-chemical characteristics

土地沙漠化已经影响中国,特别是西部地区的可持续发展^[1]。目前,沙漠化的治理主要采取工程治沙、化学治沙和植物治沙等措施,对遏制沙漠化取得了一定成效,但前两种措施虽能快速固定流沙,却达

收稿日期: 2014-06-06

修回日期: 2014-07-03

资助项目: 教育部高等学校博士学科点专项基金“人工湿地修复荒漠化土地可行性及关键技术研究”(20126120110017)

第一作者: 曹亚锋(1987—),男(汉族),陕西省蒲城县人,硕士研究生,研究方向为水质生态净化。E-mail: cyaf1987@126.com。

通信作者: 任勇翔(1968—),男(汉族),陕西省铜川市人,博士,教授,主要从事水环境生态的生物修复理论与技术研究。E-mail: ryx@xauat.edu.cn。

不到沙漠化土地修复的目的^[2]。植物治沙是其中最有效的治沙措施,但需耗费大量的人力、物力,修复周期长,尤其是为保证稳定的水源和肥源供给需花费大量资金。随着我国城镇化进程的不断加快,位于沙漠化区域或周边城镇的生活污水发生量也不断增加,若不加处理,则会使脆弱的生态环境更加恶化。传统的Ⅱ级生物处理主要是通过微生物作用矿化水中的污染物,导致资源(植物生长的营养物,如有机质、氮和磷等)浪费,且投资、运行费用高,对经济欠发达的地区难以承受。人工湿地投资和运行维护费用低,易于管理,已广泛应用于污水处理领域。由于沙漠化地区一般处于干旱、半干旱地区,夏季蒸发量大、冬季寒冷使表面流人工湿地在该地区的应用受到限制;垂直流湿地相对于潜流湿地投资高,运行复杂,且在夏季存在卫生问题^[3];潜流湿地中污水从填料表面下通过,卫生条件和保温性好,对污水中污染物净化效率高,但为防止填料空隙堵塞、保证其运行稳定性,一般选取砾石、粗砂等大粒径材料作为湿地填料^[4]。沙漠化土地的沙粒多属细沙等级,其过小的粒径不能满足传统潜流人工湿地稳定运行的要求。近年的研究成果^[5-7]表明,极浅型潜流人工湿地因其成功诱导了植物根系的超常生长,在湿地中形成了大量稳定的过水通路(包括丰富的植物根系和根系对其周边填料的强力疏松作用),成功克服了因填料粒径过小而导致的填料孔隙易堵塞、湿地运行稳定性差的难题。这就使得以沙漠化土壤为湿地填料,以城镇污水为水源和肥源修复沙漠化土壤成为可能。本研究以极浅型潜流人工湿地为技术支撑,以细沙为其填料,探讨将污水中的污染物(即植物所需营养物)部分富集到细沙中,进而同步实现沙漠化土地的快速修复和污水净化。

1 材料与方法

1.1 试验设计与系统运行

极浅型潜流湿地设置为长 2.70 m,宽 2.00 m,其中配水区、处理区和集水区分别为 0.35 m,2.00 m 和 0.35 m。原细沙(MS)取自陕西省榆林市榆阳区

金鸡滩镇,以细沙(0.05~0.25 mm)为主(占 90%以上),粉沙(0.002~0.05 mm)含量极少,不含粗砂(0.25~1 mm)。湿地共 6 块,依种植植物不同分为:高羊茅湿(CW₁)、黑麦草湿地(CW₂)、狗牙根湿地(CW₃)、芦苇湿地(CW₄)、香蒲湿地(CW₅)和未种植物湿地(CW₆),填料厚度均为 0.1 m,运行水位为 0.08 m。系统进水为西安市某污水处理厂初沉池出水,水力负荷为 0.015 m³/(m²·d)。为了观察同种植物在湿地与陆地的生长差异,同时设置了陆地对照组。

1.2 土壤取样与分析方法

每块湿地距池壁、配水区和集水区各 0.2 m 均匀布设 9 个取样点,将 9 个样品混合后作为一个试样,取样间隔约 15 d。试样风干后依据分析要求过筛,pH 值及电导率(EC)均采用 1:5 土水(蒸馏水)比浸提后,分别采用上海图新电子科技有限公司生产的雷磁 PHS-3CpH 计和郑州南北仪器设备有限公司生产的 SX751 型便携式电导率仪测定;容重采用量筒计量体积,然后烘干称重,孔隙率通过计算获得^[8];有机质采用重铬酸钾外加热法^[9];速效氮采用碱解扩散法^[8];全磷采用氢氧化钠熔融—钼锑抗比色法测定^[10];有效磷采用 0.5 mol/L 的碳酸氢钠钼锑抗比色法^[11]、采用上海始恒仪器设备有限公司生产的 UV-752 型紫外—可见分光光度仪测定。数据处理与显著性分析采用 SPSS Statistics 17.0(显著水平取 0.05)。

2 结果与分析

2.1 系统进出水质情况

移栽初期为使植物能够适应污水环境,采用阶梯式稀释的污水作为系统进水 3 周。正常运行后用标准分析法测定进出水水质指标^[11],结果详见表 1。由表 1 可以看出,试验期间,CW₁—CW₅ 出水水质稳定,其出水 COD,TN 及 TP 均达到城镇污水一级 A 排放标准(GB18918—2002),而 CW₆ 多次出现堵塞,需人工疏通,出水水质较差,不能稳定达到沙漠化土地修复和污水净化的目的。

表 1 湿地进、出水水质情况

湿地	pH 值	EC/($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)	浊度/NTU	COD/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	TN/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	TP/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)
进水	7.77±0.12	1 248±30	174.05±22.92	168.10±8.57	45.39±3.10	6.49±0.74
CW ₁	7.56±0.11	1 339±12	27.53±16.45	29.90±9.26	5.87±2.42	0.32±0.15
CW ₂	7.69±0.17	1 351±10	19.84±10.08	31.39±10.36	6.15±1.98	0.28±0.09
CW ₃	7.52±0.11	1 169±27	54.22±22.93	34.95±6.61	8.11±3.13	0.29±0.27
CW ₄	7.68±0.14	1 182±53	23.05±12.40	31.85±8.08	8.21±4.35	0.28±0.20
CW ₅	7.71±0.15	1 592±93	21.26±12.92	30.54±8.53	6.72±2.16	0.28±0.09
CW ₆	7.86±0.11	1 246±21	44.18±19.96	73.84±4.55	16.49±10.01	1.67±1.50

注:表中数据为平均数±标准差($n=36$),时间自 2013 年 8 月至 12 月中旬。

2.2 植物生长状况

试验选取均为多年生窄叶植物作为栽培植物。湿地中植物在植株高度、叶片宽度、叶片数量方面,均优于同期陆地对照组。湿地中黑麦草、高羊茅在冬季依旧生长旺盛,多次分蘖,并且能够在细沙表层形成须根根系网,而湿地中狗牙根、芦苇和香蒲于 11 月下旬枯萎,与陆地对照组的同类植物常绿期相同。

2.3 细沙 pH 和电导率的变化

土壤的酸碱性直接影响植物的生长和微生物的活性以及土壤肥力状况与其他性质。试验期间(图 1),各

湿地中细沙 pH 值均增加了 3%~5%(以中位数计,下同),与原细沙(MS)差异性显著($p < 0.05$),出现这一现象的原因应是污水中大量交换性 Na^+ , K^+ 及 NH_4^+ 等离子被细沙吸附所致^[12];而 CW_1 — CW_6 之间无显著性差异($p > 0.05$)。土壤电导率高低可以反映土壤中水溶性盐的含量。试验期间,各湿地细沙电导率增加了 1.7~2.6 倍(图 1),与 MS 差异性显著($p < 0.05$),出现这一现象的原因应是污水中 Na^+ , K^+ 等离子被细沙吸附及矿化作用增加细沙中带电离子所致;而 CW_1 — CW_6 之间无显著差异($p > 0.05$)。

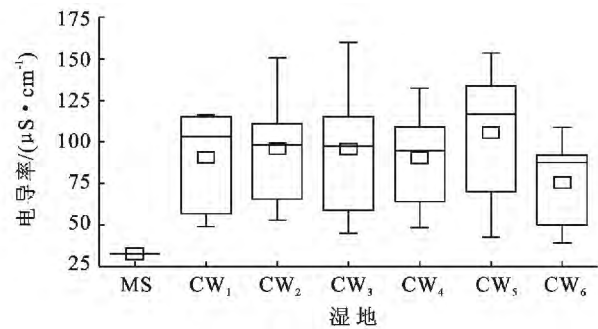
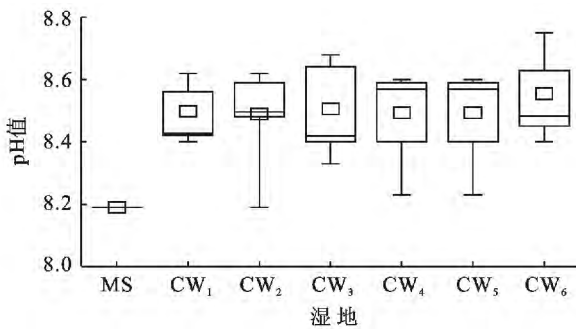


图 1 不同湿地中细沙 pH 值和电导率的变化($n=6$)

2.4 细沙容重和孔隙率的变化

土壤孔隙率和容重是反映土壤固体颗粒的基本参数,土壤容重小,表明土壤比较疏松,孔隙多;反之,表明土体比较紧实,结构性差,孔隙少^[13]。由图 2 可知,各湿地细沙容重减小了 20%~23%,与 MS 差异

性显著($p < 0.05$);细沙孔隙率增大了 16%~25%(图 2),与 MS 差异性显著($p < 0.05$),而 CW_1 — CW_6 之间无显著性差异($p > 0.05$)。细沙容重减小、孔隙率增大,说明极浅型潜流湿地能够增加细沙的通透性,改善细沙团粒结构。

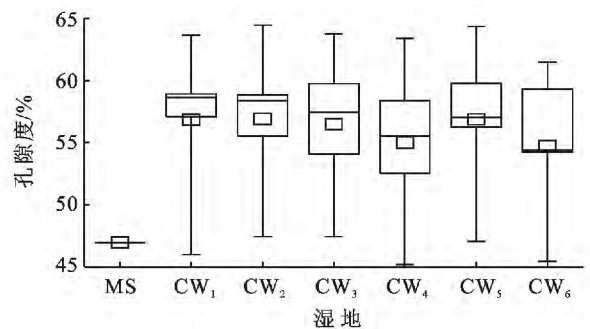
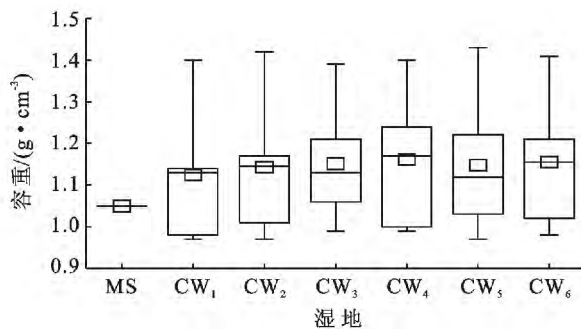


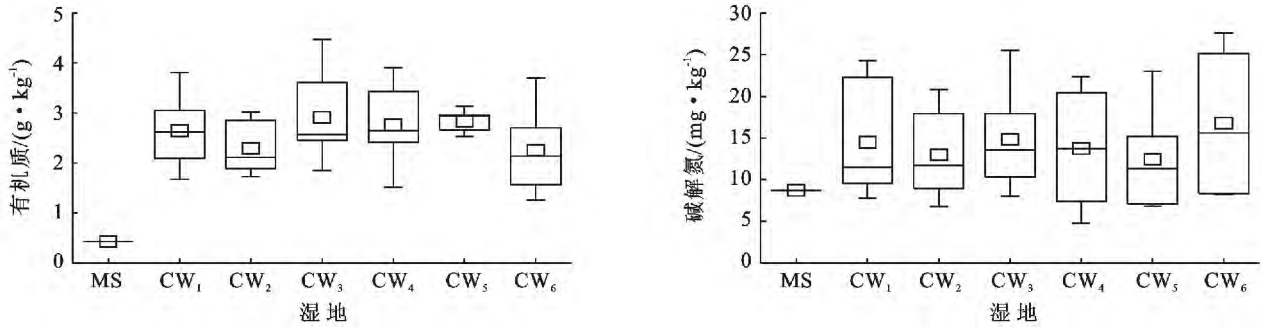
图 2 不同湿地中细沙容重和孔隙率的变化($n=6$)

2.5 细沙中有机质和碱解氮的变化

土壤肥力是反映土壤质量的一个重要指标之一,而土壤有机质的含量是衡量土壤肥力的重要指标,有机质对土壤的理化性质有重要作用^[14]。从图 3 可以看出,湿地细沙中有机质含量在 2.12~2.94 g/kg,增加了 3.9~5.8 倍,与 MS 差异性显著($p < 0.05$),而 CW_1 — CW_6 之间无显著性差异($p > 0.05$),表明在湿地运行过程中,细沙中有机质显著增加,但种植植物

与否及植物类别对细沙有机质累积无显著性影响。

氮是土壤中最活跃的大量营养元素之一,也是植物需要量较大的营养元素,其含量反映了植物生长期利用氮素的高低和土壤的供氮水平^[15]。试验期间,各湿地细沙中碱解氮含量增加了 29%~78%(图 3),与 MS 无显著性差异($p > 0.05$), CW_1 — CW_6 之间无显著性差异($p > 0.05$),表明湿地运行有助于细沙中碱解氮的累积,但增加不显著。

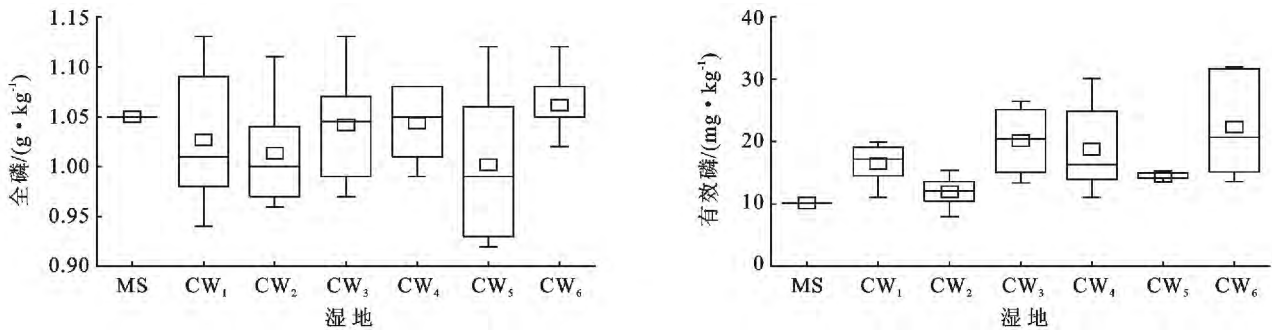
图 3 不同湿地中细沙有机质和碱解氮的变化 ($n=6$)

2.6 细沙中全磷和有效磷的变化

土壤中的全磷包括有机态和无机态两种形式,有机态磷主要来源于成土过程中生物作用,而无机磷除使用化肥外主要来源于成土母质,对于表层土壤来说,其全磷含量受母质和植被的共同作用^[15]。试验期间,CW₁—CW₆中细沙与MS相比,全磷含量有减小的趋势(图4),且无显著性差异($p>0.05$),表明在湿地运行期间细沙中全磷含量变化不明显,这与李中

阳等^[16]人的研究一致。

磷是植物生长必须的营养元素,而有效磷是为作物生长提供直接的磷养分资源^[17]。试验期间,各湿地细沙中有效磷含量增加了16%~103%(图4),与MS差异性显著($p<0.05$),CW₁—CW₆之间无显著性差异($p>0.05$),表明湿地运行有助于细沙中有效磷的累积,但种植植物与否及植物类别对细沙中有效磷累积无显著性影响。

图 4 不同湿地中细沙全磷和有效磷的变化 ($n=6$)

2.7 营养物累积量与污染物去除量的相关性

人工湿地通过截留、吸附等途径将污水中部分污染物滞留在湿地填料中,导致填料中的养分增加^[18-19]。通过统计分析,以细沙中有机质、碱解氮和有效磷与湿地进出水中COD、TN和TP中值作为计算依据,得出各湿地细沙中营养物累积量与湿地对污染物的去除量的相关性(如表2所示)。从表2可以看出,细沙中有机质累积百分比最高,为79.64%~118.01%,有效磷次之,为3.60%~22.16%,碱解氮最低,为0.73%~2.20%。细沙中有机质(CW₃—CW₆)的累积量大于污水中的去除量,其原因是微生物的大量繁殖形成颗粒状有机质、植物根系分泌物及植物腐烂等引起的。

极浅型湿地中植物须根根系的发达程度显著优于其他类型湿地^[5]。周心澄等^[20]指出,丰富的根系能提高土壤的有机质含量,陈署晃等^[21]认为土壤有

机质是各类营养元素特别是氮磷的重要来源,其含量增加对于保持肥力和提高作物产量有积极的作用。试验4个月期间,细沙中有机质从0.43 g/kg增加到2.00 g/kg以上,明显优于封育恢复5 a沙漠化逆转土地中有机质从约1.40 g/kg增加到约2.20 g/kg的效果^[22],说明极浅型潜流人工湿地修复沙漠化土地能使细沙中有机质快速累积,对提高细沙养分含量具有明显的优势;另外,结合2.1~2.6和表2的结果可知,在保证处理水稳定达标的前提下,各湿地细沙理化性质都得到了有效改善,但不存在显著性差异,即不同植物对细沙的理化性质短期无显著影响。高羊茅和黑麦草在湿地中四季常绿,分蘖能力强,且相较于其他冬季枯萎植物,栽培高羊茅和黑麦草的湿地在冬季依然保持较好的污染物处理效果^[7]和景观效应,因此,高羊茅和黑麦草可作为修复沙漠化土地的优选植物。

表 2 营养物累积量占去除量的比例 %

湿地	有机质	碱解氮	有效磷
CW ₁	99.61	0.73	12.96
CW ₂	79.64	0.83	3.60
CW ₃	104.15	1.42	19.39
CW ₄	106.14	1.44	11.58
CW ₅	118.01	0.74	7.47
CW ₆	106.23	2.20	22.16

3 结论

(1) 以细沙为填料的各极浅型潜流湿地可稳定运行,且出水 COD, TN 及 TP 均稳定达到城镇生活污水一级 A 排放标准;而不栽培植物的潜流土地处理单元时常堵塞,出水水质较差,说明栽培植物为沙漠化土地的稳定持续修复和水中污染物高效去除发挥了关键作用。

(2) 以极浅型潜流湿地修复沙漠化土地能够增强细沙中的肥力,为植物生长创造有利的条件,使细沙理化性质向良性方向发展。各湿地细沙有机质、有效磷、pH 值、电导率及孔隙率较原细沙均显著增加 ($p < 0.05$),容重显著减小 ($p < 0.05$),碱解氮和全磷无显著变化 ($p > 0.05$)。

(3) 各湿地细沙之间有机质、碱解氮、全磷、有效磷、pH 值、电导率、容重及孔隙率无显著性差异 ($p > 0.05$),表明不同植物短期对细沙物理化学性质变化无显著性影响。高羊茅和黑麦草四季常绿,可作为修复沙漠化土地的优选植物。

[参 考 文 献]

- [1] 余艳玲,李卫忠,姜英. 毛乌素土地利用类型解译标志的建立:以榆阳区为例[J]. 西北林学院学报,2005,20(3): 10-13.
- [2] 胡开波,刘凯,蒋勇,等. 我国土地沙漠化防治技术体系研究进展[J]. 四川林业科技,2009,30(6):87-92.
- [3] 关艳艳,余宗莲,周艳丽,等. 人工湿地处理污染河水的研究进展[J]. 水处理技术,2010,36(10):10-15.
- [4] 杨旭,万鲁河,王继富,等. 潜流人工湿地基质因素对农业径流净化作用的研究[J]. 中国农学通报,2010,26(14):336-338.
- [5] Ren Yongxiang, Zhang Hai, Wang Chao. Effects of the substrate depth on purification performance of a hybrid constructed wetland treating domestic sewage[J]. Journal of Environmental Science and Health(Part A),2011, 46(7):777-782.
- [6] 马刚,任勇翔,鲁浩,等. 水培—复合人工湿地去除直链

烷苯磺酸盐中试研究[J]. 环境科学与技术,2014,37(2):119-122.

- [7] 王新伟,任勇翔,曹亚锋,等. 细沙作为极浅型潜流人工湿地的可行性研究[J]. 水处理技术,2015,41(1):120-123.
- [8] 鲁如坤. 土壤农业化学分析[M]. 北京:中国农业科技出版社,1999.
- [9] 全国农业技术推广服务中心. NY/1121.6—2006 中华人民共和国农业行业标准[S]. 北京:中华人民共和国农业部,2006.
- [10] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京:中国农业出版社,2000.
- [11] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 4 版. 北京:中国环境科学出版社,2002.
- [12] 熊顺贵. 基础土壤学[M]. 北京:中国农业出版社,2000.
- [13] 杨梅焕,曹明明,朱志梅,等. 毛乌素沙地东南缘沙漠化过程中土壤理化性质分析[J]. 水土保持通报,2010,30(2):169-172.
- [14] 谭明亮,段争虎,陈小红. 流沙地恢复过程中土壤特性演变研究[J]. 中国沙漠,2008,28(4):685-689.
- [15] 石辉,吴金水,陈占飞. 陕北沙区不同利用方式风沙土的养分特征[J]. 植物营养与肥料学报,2002,8(4):385-389.
- [16] 李中阳,樊向阳,齐学斌,等. 城市污水再生水灌溉对黑麦草生长及土壤磷素转化的影响[J]. 中国生态农业学报,2012,20(8):1072-1076.
- [17] 王风,朱岩,陈思,等. 冻融循环对典型地带土壤速效氮磷及酶活性的影响[J]. 农业工程学报,2013,29(24): 118-123.
- [18] Sundaravadivel M, Vigneswaran S. Constructed wetlands for wastewater treatment[J]. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 2001, 31(4): 351-409.
- [19] Christina Vohla, Reimo Alas, Kaspar Nurk, et al. Dynamics of phosphorus, nitrogen and carbon removal in a horizontal subsurface flow constructed wetland[J]. Science of The Total Environment, 2007, 380(1/3): 66-74.
- [20] 周心澄,沈晶玉,张伟华,等. 祁连山南麓植物根系改善土壤抗冲性研究[J]. 中国水土保持科学,2004,2(4): 87-91.
- [21] 陈署晃,耿庆龙,马彦茹等. 吉尔吉斯斯坦共和国与新疆耕地土壤有机质变化分析[J]. 新疆农业科学,2013,50(19):1748-1752.
- [22] 靳虎甲,王继和,李毅,等. 腾格里沙漠南缘沙漠化逆转过程中的土壤化学性质变化特征[J]. 水土保持学报, 2008,22(5):119-124.